CONCOURS COMMUN SUP 2002
DES ÉCOLES DES MINES D'ALBI, ALÈS, DOUAI, NANTES

Épreuve de Physique et Chimie (toutes filières)

Proposition de correction

ANALOGIES ET DIFFERENCES

PHYSIQUE I : Interprétation d'un mouvement dans deux référentiels

A - Etude dans le référentiel R du laboratoire :

A-1 Les forces sont : le poids, la réaction et la force élastique.
Le poids et la réaction du support se compensent.
$\frac{d\vec{L_o}}{dt} = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{f} = \vec{0}$: Il y a conservation du moment cinétique.

A-2-1 $\vec{L}_o = cte = \vec{L_o}(t=0) = \vec{0}$:
Le mouvement est rectiligne suivant l'axe Ox.

A-2-2 D'après la relation fondamentale, $m\frac{d^2l}{dt^2} + k(l - l_o) = 0$: $\frac{d^2l}{dt^2} + \frac{k}{m}(l - l_o) = 0$

$l = l_o + A\cos(\omega_o t) + B\sin(\omega_o t)$ avec $\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

A t=0 , $l = 1.2l_o$ et $\frac{dl}{dt} = 0$ alors A= $0.2l_o$ et $B = 0$: $\boxed{l = l_o + 0{,}2l_o \cos(\omega_o t)}$
et $\boxed{l \in [0{,}8l_o, 1{,}2l_o]}$

A-3-1 $\vec{L_o} = mr^2\left(\frac{d\theta}{dt}\right)\vec{k}$
$\vec{L_o} = cte = \vec{L_o}(t=0) = ml_1^2\omega\vec{k}$

A-3-2 La tension dérive d'une énergie potentielle, $E_p = \frac{1}{2}k(r - l_o)^2$

Il n'y a pas à tenir compte de l'énergie potentielle de pesanteur car le mouvement est dans un plan perpendiculaire à $\vec{g}$. E_p est constante.
Le poids et la réaction ne travaillent pas ici. Il y a conservation de l'énergie mécanique car la tension dérive d'une énergie potentielle.

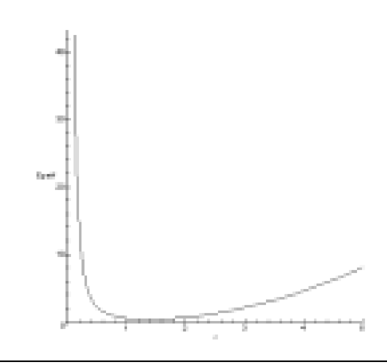
$E_m = \frac{1}{2}ml_1^2\omega^2 + \frac{1}{2}k(l_1 - l_o)^2$

$E_m = \frac{1}{2}m\left(\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2\right) + \frac{1}{2}k(r - l_o)^2$.

A-3-3 $E_m = \frac{1}{2}m\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}m\frac{l_1^4\omega^2}{r^2} + \frac{1}{2}k(r - l_o)^2\right)$

$E_{p_{eff}} = \frac{1}{2}m\frac{l_1^4\omega^2}{r^2} + \frac{1}{2}k(r - l_o)^2$

NB : (G) = graphe.

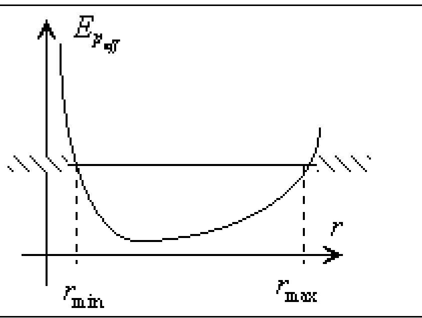


A-3-4 Si on superpose au graphe précédent, la droite E_m =cte, la trajectoire est toujours bornée entre 2 cercles de rayons r_{min} et r_{max}. La masse ne peut donc pas s'éloigner indéfiniment.

<u>Autre méthode possible :</u>

Comme L est constant, OM est borné donc M ne peut aller à l'infini

NB : Chaque correcteur appréciera une réponse à sa juste valeur.



A-3-5 La vitesse ne peut s'annuler à cause de la conservation du moment cinétique.

A-3-6 La distance r ne peut s'annuler à cause de la conservation du moment cinétique.
On peut le constater aussi sur la barrière de potentielle, $r>r_{min}$.

A-4-1 Si $r = l_1$ est constant, à cause de la conservation du moment cinétique, $\frac{d\theta}{dt} = \frac{ml_1^2\omega}{mr^2} = \omega$: le mouvement est circulaire uniforme.

A-4-2 Le mouvement circulaire correspond au minimum de $E_{p_{eff}}$ pour $r=l_1$.

Or, $\frac{dE_{p_{eff}}}{dr} = -m\frac{l_1^4\omega^2}{r^3} + k\left(r - l_o\right) = 0$ pour $r=l_1$ alors $m\frac{l_1^4\omega^2}{l_1^3} = k\left(l_1 - l_o\right)$: $\left(k - m\omega^2\right)l_1 = kl_o$:

$\boxed{l_1 = \frac{kl_o}{k - m\omega^2}}$ si $\boxed{\omega < \sqrt{\frac{k}{m}}}$.

<u>*Autre méthode*</u> :

On peut utiliser la base de Frenet : $m\frac{v^2}{l_1} = k\left(l_1 - l_o\right) = m\frac{l_1^2\omega^2}{l_1}$ alors $\boxed{l_1 = \frac{kl_o}{k - m\omega^2}}$

<u>B - Etude dans un référentiel R' en rotation uniforme autour d'un axe fixe :</u>

B-1 $\overrightarrow{f_{ie}} = m\omega^2 r\overrightarrow{e_r}$; $\overrightarrow{f_{ic}} = -2m\omega\vec{k} \wedge \frac{dr}{dt}\overrightarrow{e_r} = -2m\omega\frac{dr}{dt}\overrightarrow{e_\theta}$

B-2 $\overrightarrow{f_{ie}} = m\omega^2 r\overrightarrow{e_r}$ dérive d'une énergie potentielle $E_p = -\frac{1}{2}m\omega^2 OM^2 = -\frac{1}{2}m\omega^2 r^2$ + démonstration(D)

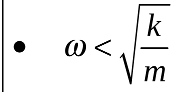
B-3 La force de Coriolis ne travaille pas car orthogonale à la vitesse.

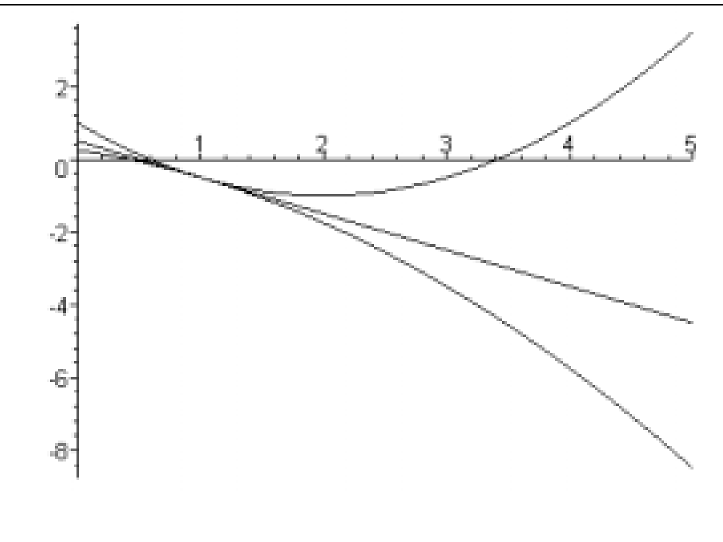
B-4 $E_p = \frac{1}{2}k\left(r - l_o\right)^2 - \frac{1}{2}m\omega^2 r^2$

$\frac{dE_p}{dr} = k\left(r - l_o\right) - m\omega^2 r$ soit

$\frac{dE_p}{dr} = \left(k - m\omega^2\right)r - kl_o$

On a 3 cas possibles :

-  $\omega < \sqrt{\frac{k}{m}}$
- $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$
- $\omega > \sqrt{\frac{k}{m}}$



B-5 L'équilibre correspond à $\frac{dE_p}{dr} = 0$ alors $k\left(l_2 - l_o\right) = m\omega^2 l_2$: $l_2 = \frac{kl_o}{k - m\omega^2}$ si $\omega < \sqrt{\frac{k}{m}}$.

L'équilibre est stable car on a un minimum d'énergie potentielle.
Le mouvement est circulaire uniforme.

B-6 On trouve $l_1=l_2$: les deux référentiels sont donc équivalents pour le mouvement circulaire et uniquement pour ce cas bien sûr !!

PHYSIQUE II : Transitoire thermique et électrique

C - Transitoire électrique :

C-1 $u_c\left(0^+\right)=0$ car il y a conservation de l'énergie donc de la tension ; $i\left(0^+\right)=\dfrac{E}{R+R_g}$
C-2 $E=\left(R+R_g\right)C\dfrac{du_c}{dt}+u_c$
C-3 $\tau=\left(R+R_g\right)C$: temps caractéristique du transitoire : Après quelques τ, on atteint le régime permanent.
C-4 $u_c\left(t\right)=E\left(1-\exp\left(-\dfrac{t}{\tau}\right)\right)$
C-5 $0.9E=E\left(1-\exp\left(-\dfrac{t_1}{\tau}\right)\right)$ alors $t_1=\ln(10)\tau=2.3\tau$
C-6 (2) e(t) et (1) u_c(t) car il y a continuité de u_c
C-7 Couplage DC (AC "alternative current " étant réservé pour un signal sinusoïdal)
C-8 Au point P, on a un diviseur de tension : $u_c=\dfrac{RE}{R+R_o}=\dfrac{2}{3}E$: $R=2R_g$: $R_g=50\Omega$
C-9 E=6V On mesure le temps de montée : t_m =4.5*0.1=0.45 ms soit τ =0.2 ms Compter 0 si on trace la tangente à l'origine (pas sur l'oscillo !!)(les candidats ont "normalement" fait des Tp et appris à utiliser l'oscilloscope). Alors $\boxed{C=\dfrac{\tau}{\left(R+R_g\right)}=1.3\mu F}$ (tolérance entre 1 et 1.5 μF)
C-10 Il faut que T>8*2*0.1=1.6 ms soit f<625 Hz.
C-11 On permute R et C ou on utilise la touche (-CH1) et (ADD) de l'oscilloscope ou on dispose d'oscilloscopes à entrée différentielle,……

D - Transitoire thermique :

D-1 A pression constante, $\delta Q=dH$. On peut aussi accepter $\delta Q=dU$ car les liquides sont quasiment incompressibles.
D-2 $dH=\left(\Gamma+mc\right)dT=\delta Q=-k\left(T-T_{ext}\right)dt+\dfrac{U^2}{R}dt$ PS : On peut aussi admettre $dH=\delta Q+\delta W_e=-k\left(T-T_{ext}\right)dt+\dfrac{U^2}{R}dt$ Alors $\boxed{\dfrac{dT}{dt}+\dfrac{k}{\Gamma+mc}T=\dfrac{k}{\Gamma+mc}\left(\dfrac{U^2}{Rk}+T_{ext}\right)}$ alors $\boxed{\tau=\dfrac{mc+\Gamma}{k}}$ et $\boxed{T_M=\dfrac{U^2}{Rk}+T_{ext}}$

T_M est la température en régime permanent : l'effet joule compense alors les fuites thermiques.
D-3 $dH = (\Gamma + mc)dT = \delta Q = -k(T - T_{ext})dt$: $\boxed{\frac{dT}{dt} + \frac{k}{\Gamma + mc}T = \frac{k}{\Gamma + mc}T_{ext}}$ $T(t) = T_{ext} + (T_o - T_{ext})\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$
D-4 On trace la tangente à l'origine : $\tau = 120s$ (tolérance entre 100 et 150 s) et $T_{ext} = 20°C$ Alors $k = \frac{mc + \Gamma}{\tau}$ =7.38 W/K.
D-5 On lit T_o= 45°C. $\Delta S_{calorimètre} = \int_{T_o}^{T_{ext}} \frac{\Gamma dT}{T} = \Gamma \ln\left(\frac{T_{ext}}{T_o}\right)$= -4.09 J.K^{-1} $\Delta S_{eau} = \int_{T_o}^{T_{ext}} \frac{mcdT}{T} = mc\ln\left(\frac{T_{ext}}{T_o}\right)$=-68.41J.K^{-1} $S_e = (mc + \Gamma)\frac{T_{ext} - T_o}{T_{ext}}$ =- 75.56 J.K^{-1} $S_c = \Delta S_{eau} + \Delta S_{calorimètre} - S_e$ = 3.05 J.K^{-1} >0 Cela traduit l'irréversibilité de la transformation.

PHYSIQUE III : Les champs électrostatiques et magnétostatiques

E- Champ électrostatique crée par une spire :

E-1 Champ sur l'axe :

E-1-1 Le plan passant par M et contenant le diamètre de l'anneau ne modifie pas globalement la distribution donc le champ $\vec{E}$ est à l'intersection de tous ces plans donc $\vec{E}$ est suivant Oz.

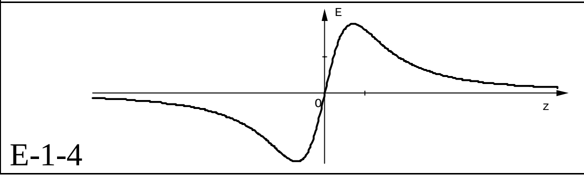
E-1-2 Une symétrie par rapport au plan de l'anneau transforme z en - z et E en -E donc E(-z) = -E(z).

E-1-3 On projette suivant l'axe $\overrightarrow{OM}$.

$\vec{E}.\vec{k} = \int_{spire} \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\lambda \frac{\overrightarrow{PM}.\vec{k}}{PM^3} dl$ avec PM = r = cte; $\overrightarrow{PM}.\vec{k}$ = r cos(α) = cte , dl = R.dθ

$$\vec{E}.\vec{k} = \int_{spire} \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\lambda \frac{\overrightarrow{PM}.\vec{k}}{PM^3} dl = \int_0^{2\pi} \frac{\lambda\cos(\alpha)}{4\pi\varepsilon_o r^2} Rd\theta \quad E = \vec{E}.\vec{k} = \int_0^{2\pi} \frac{\lambda\cos(\alpha)}{4\pi\varepsilon_o r^2} Rd\alpha = \frac{2\pi\lambda R\cos(\alpha)}{4\pi\varepsilon_o r^2}$$

$$\boxed{E = \frac{\lambda R\cos(\alpha)\sin^2(\alpha)}{2\varepsilon_o R^2} = \frac{\lambda z R}{2\varepsilon_o\sqrt{z^2+R^2}\,(z^2+R^2)}} : \boxed{E = \frac{\lambda z R}{2\varepsilon_o\sqrt[2]{(z^2+R^2)^3}} = \frac{zQ}{4\pi\varepsilon_o\sqrt[2]{(z^2+R^2)^3}}}$$

E-1-4


E-2 Champ au voisinage de l'axe :

E-2-1 Le plan passant par l'axe Oz laisse la spire invariante donc E est appartient au plan de symétrie donc $E_\theta = 0$.

E-2-2 Toute rotation autour de l'axe Oz à r et z fixés ne modifie pas le champ $\vec{E}$ donc E ne dépend pas de θ.

E-2-3 Le champ $\vec{E}$ est à flux conservatif en l'absence de charge car d'après le théorème de Gauss :

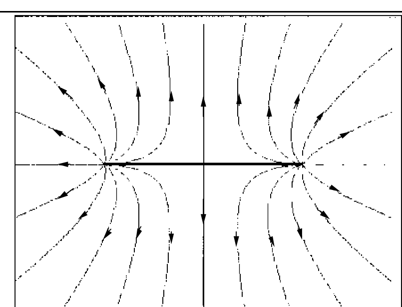
$$\phi = \oiint_{(S)} \vec{E}.\overrightarrow{dS} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_o} = 0$$

Le champ $\vec{E}$ est toujours à circulation conservative.

E-2-4 Si on considère un cylindre de hauteur dz et de section circulaire alors

$E(z+dz)\pi r^2 - E(z)\pi r^2 + 2\pi r dz E_r(r,z)$ =0. Alors $\boxed{E_r(r,z) = -\frac{r}{2}\frac{dE_z(z)}{dz}}$

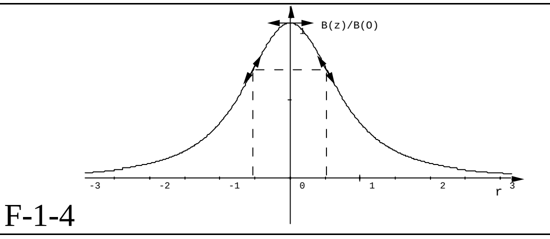
$$\frac{dE}{dz} = \frac{\lambda R}{2\varepsilon_o}\left(\frac{1}{(z^2+R^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{3}{2}\frac{2z^2}{(z^2+R^2)^{\frac{5}{2}}}\right) \text{soit} \quad \frac{dE}{dz} = \frac{\lambda R(R^2-2z^2)}{2\varepsilon_o(z^2+R^2)^{\frac{5}{2}}} : \boxed{E_r(r,z) = -\frac{r}{2}\frac{dE}{dz} = -\frac{\lambda r R(R^2-2z^2)}{4\varepsilon_o(z^2+R^2)^{\frac{5}{2}}}}$$

E-2-5-1  Les lignes de champ divergent de l'anneau.

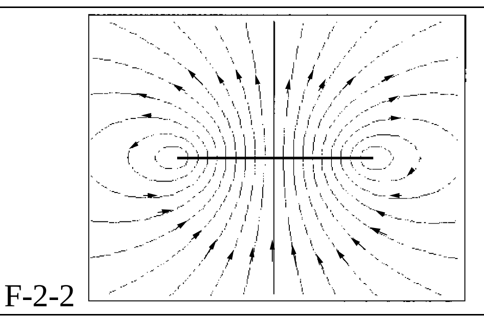
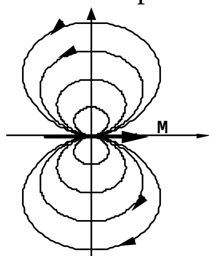
E-2-5-2 A grande distance, la distribution est équivalente à une charge ponctuelle. On aura des droites issues de O.
E-2-5-3 Les équipotentielles tendent vers des sphères (ou des cercles en coupe)
E-2-5-4 Sur une équipotentielle, V=cte alors dV=0 alors $\vec{E}.\vec{dl}$ =0 : $\vec{E}$ est orthogonal à l'équipotentielle. On a une équipotentielle à 2 nappes donc le champ E doit être nul à l'intersection ce qui est le cas.
E-2-5-5 E_r est <0 si $z < \frac{R}{\sqrt{2}}$ et >0 au delà donc E s'approche de l'axe avant de s'éloigner.

F- Champ magnétostatique créé par une spire parcourue par un courant I :

F-1 Champ sur l'axe :

F-1-1 Si on fait une symétrie par rapport au plan P passant par l'axe du disque, celui-ci transforme le courant en son opposé alors $\vec{B}$ est invariant par cette symétrie donc $\vec{B}$ appartient à l'axe: $\vec{B} = B\vec{k}$
F-1-2 Une symétrie par rapport à la distribution des courants transforme z en -z sans modifier $\vec{B}$ donc B(z) = B(-z).
F-1-3 $\vec{B}.\vec{k} = B = \frac{\mu_o I}{4\pi} \oint_{circuit} \left(d\vec{l} \wedge \frac{\vec{u}}{r^2} \right) \vec{k}$ .Or, $r^2 = R^2 + z^2$ est une constante dans l'intégration. $(\vec{d\mathbf{l}} \wedge \vec{\mathbf{u}})\vec{\mathbf{k}} = dl \sin\alpha$: $\sin\theta = \frac{R}{\sqrt{R^2+z^2}}$ alors B(z) = $\int_0^{2\pi} \frac{\mu_o I}{4\pi} sin\alpha \frac{Rd\phi}{R^2+z^2} = \frac{\mu_o IR^2}{2(\sqrt{R^2+z^2})^3} = \frac{\mu_o I}{2R} \sin^3\alpha$ $B(z) = \frac{\mu_o I}{2R} \sin^3\alpha = B_o \frac{1}{\left(\sqrt{1+\frac{z^2}{R^2}}\right)^3}$ avec $\tan(\alpha) = \frac{R}{z}$. Au centre, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ donc $\boxed{\vec{B_o} = \frac{\mu_o I}{2R}\vec{k}}$
 F-1-4

F-2 Champ au voisinage de l'axe :

F-2-1 Le plan passant par l'axe Oz laisse la spire invariante mais transforme I en -I, comme B est antisymétrique appartient au plan de symétrie donc B_θ = 0. Toute rotation autour de l'axe Oz à r et z fixés ne modifie pas le champ $\vec{B}$ donc B ne dépend pas de θ.	
 F-2-2	F-2-3 On obtient un dipôle magnétique : 
F-2-4 Les lignes de champs électrostatiques divergent des sources alors que les lignes de champs magnétiques circulent autour des sources.	
F-2-5 Le champ $\vec{B}$ est toujours à flux conservatif et au voisinage de l'axe où il n'y a pas de courant, $\vec{B}$ est à	

circulation conservative. On a les mêmes propriétés que pour le champ $\vec{E}$ donc les mêmes conclusions. $B_r(r,z) = -\frac{r}{2}\frac{dB_z(z)}{dz}$
F-2-6 $B_r(r,z) = -\frac{r}{2}\frac{dB_z(z)}{dz} = +B_o \frac{3zr}{2R^2}\frac{1}{\left(\sqrt{1+\frac{z^2}{R^2}}\right)^5}$

CHIMIE : Autour de l'ammoniac

I- Structure

I-1 Z=7 : $N(1s)^2(2s)^2(2p)^3$

I-2

NH_3 : H-N-H (H) ; HNO_2 : O=N-O — H ; HNO_3 : H-O-N=O (O) ⊕ ⊖

I-3 molécule	p+q	Polyèdre de coordination XpEq	formule structurale	forme de la molécule AXm
NH_3	4	tétraèdre	AX3E1	pyramide à base triangulaire
HNO_3	3	triangle	AX3E0	triangulaire équilatérale
HNO_2	3	équilatéral	AX2E1	Coudée à environ 120°

I-4 Contrairement au phosphore, l'azote qui appartient à la deuxième période doit vérifier la règle de l'octet. NF_6^- ne peut donc exister.

II - Les propriétés acido-basiques de NH_3

II-1 $NH_3 + H_3O^+ \rightleftharpoons NH_4^+ + H_2O$:

La constante d'équilibre est K = $10^{9.2}$ >>1 : La réaction est quasiment totale.

II-2 Les deux pentes sont >0 mais la seconde pente est plus élevée car la mobilité de H_3O^+ est plus élevée que NH_4^+.

II-3 A l'équivalence, $C_aV_a = C_bV_b$ alors comme V_a = 9 mL alors $\boxed{C_b = 0,09 mol.L^{-1}}$

III - Les propriétés complexantes de NH3: Mesure de log(β_4) pour $Cu(NH_3)_4^{2+}$:

III-1 $\beta_1 = \frac{\left[Cu\left(NH_3\right)^{2+}\right]}{[NH_3]\left[Cu^{2+}\right]}$; $\beta_2 = \frac{\left[Cu\left(NH_3\right)_2^{2+}\right]}{[NH_3]^2\left[Cu^{2+}\right]}$; $\beta_3 = \frac{\left[Cu\left(NH_3\right)_3^{2+}\right]}{[NH_3]^3\left[Cu^{2+}\right]}$; $\beta_4 = \frac{\left[Cu\left(NH_3\right)_4^{2+}\right]}{[NH_3]^4\left[Cu^{2+}\right]}$

$K_{d1} = \frac{[NH_3]\left[Cu^{2+}\right]}{\left[Cu\left(NH_3\right)^{2+}\right]}$; $K_{d2} = \frac{[NH_3]\left[Cu\left(NH_3\right)^{2+}\right]}{\left[Cu\left(NH_3\right)_2^{2+}\right]}$; $K_{d3} = \frac{[NH_3]\left[Cu\left(NH_3\right)_2^{2+}\right]}{\left[Cu\left(NH_3\right)_3^{2+}\right]}$; $K_{d4} = \frac{[NH_3]\left[Cu\left(NH_3\right)_3^{2+}\right]}{\left[Cu\left(NH_3\right)_4^{2+}\right]}$

alors $K_{d1} = \frac{1}{\beta_1}$; $K_{d2} = \frac{\beta_1}{\beta_2}$; $K_{d3} = \frac{\beta_2}{\beta_3}$; $K_{d4} = \frac{\beta_3}{\beta_4}$

alors $pK_{d1} = \log\left(\beta_1\right) = 4.2$; $pK_{d2} = \log\left(\beta_2\right) - \log\left(\beta_1\right) = 3.4$; $pK_{d3} = \log\left(\beta_3\right) - \log\left(\beta_2\right) = 3$

$pK_{d4} = \log\left(\beta_4\right) - \log\left(\beta_3\right) = 2$

	$Cu(NH_3)_4^{2+}$	$Cu(NH_3)_3^{2+}$	$Cu(NH_3)_2^{2+}$	$Cu(NH_3)^{2+}$	Cu^{2+}
III-2	2	3	3.4	4.2	pNH_3

III-3-1 L'ammoniaque est en excès et les espèces intermédiaires ne sont jamais majoritaires donc on a la forme la plus stable : $Cu(NH_3)_4^{2+}$

$$Cu^{2+} + 4NH_3 \rightleftharpoons Cu(NH_3)_4^{2+}$$

III-3-2 ***Attention*** : On a une dilution d'un facteur 2 lors du mélange : La réaction étant fortement avancée :

	Cu^{2+} +	$4NH_3$ $\rightleftharpoons$	$Cu(NH_3)_4^{2+}$
CI	0,005	0,5	
C_{eq}	ε	0,48	0,005

$$[NH_3] = 0,48 mol.L^{-1};\ \left[Cu(NH_3)_4^{2+}\right] = 0,005 mol.L^{-1};\ \boxed{\left[Cu^{2+}\right] = \frac{\left[Cu(NH_3)_4^{2+}\right]}{\beta[NH_3]^4} = 2.36.10^{-14} mol/L}$$

III-4-1 $E = E°(Cu^{2+}/Cu) + 0,03\log([Cu^{2+}])$

Alors, $U = E°(Cu^{2+}/Cu) + 0,03\log([Cu^{2+}]_A) - E°(Cu^{2+}/Cu) + 0,03\log([Cu^{2+}]_B)$

$$\boxed{U = 0,03\log\left(\frac{[Cu^{2+}]_A}{[Cu^{2+}]_B}\right) = 349 mV}$$

III-4-2 $(+)Cu\left|Cu^{2+}\right\|Cu(NH_3)_4^{2+}\left|Cu(-)\right.$

III-4-3 A la cathode (+) : $Cu^{2+} + 2é \rightleftharpoons Cu$

A l'anode (-) : $Cu + 4NH_3 \rightleftharpoons Cu(NH_3)_4^{2+} + 2é$

Le bilan : $Cu^{2+} + 4NH_3 \longrightarrow Cu(NH_3)_4^{2+}$

III-4-4 Le pont salin assure la conduction des ions.

IV - Les propriétés thermodynamiques de NH3:

La réaction : $N_2 + 3H_2 \Leftrightarrow 2NH_3$

IV-1 $\boxed{\Delta_r H°(298) = 2\Delta_f H°(NH_3) = -92,42 kJ.mol^{-1}}$

IV-2 $\Delta_r H°(770) = \Delta_r H°(298) + \int_{298}^{770} \left(2Cp_{NH_3} - Cp_{N_2} - 3Cp_{H_2}\right) dT$

$$\Delta_r H°(770) = \Delta_r H°(298) + \left(2Cp_{NH_3} - Cp_{N_2} - 3Cp_{H_2}\right)(770 - 298)$$

$$\boxed{\Delta_r H°(1000) = -120.85 kJ/mol}$$

La réaction est exothermique.

IV-3 $4NH_3 + 5O_2 \longrightarrow 4NO + 6H_2O$

IV-4-1 La probabilité de collision entre 3 molécules est nulle.

IV-4-2 Le mécanisme est par stade car l'intermédiaire créé à l'étape i et consommé à l'état i+1

IV-4-3 $\frac{d[NO_2]}{dt} = 2k_2[N_2O_2][O_2]$. Or , $\frac{[N_2O_2]}{[NO]^2} = \frac{k_1}{k_{-1}}$ alors $v = k_2\frac{k_1}{k_{-1}}[NO]^2[O_2]$: ordre 3